

主星带小卫星分布式 SAR 干涉的相对测高精度分析

刘建平 梁甸农 何峰
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 相对测高精度是干涉 SAR 测高性能的重要指标之一。该文根据主星带小卫星分布式 SAR 系统的实际空间几何条件下建立了干涉测高原理;基于相对测高几何,推导了相对测高精度与干涉相位误差的关系式;理论分析了基线去相关、图像配准误差去相关、热噪声去相关等,并推导了图像相关系数;最后,仿真分析了图像去相关因素对于主星带小卫星分布式 SAR 干涉的相对测高精度影响。结果发现:对于平坦地形来说,热噪声与配准误差是影响相对测高精度的主要因素,而基线去相关影响相对较小。

关键词 分布式小卫星,合成孔径雷达干涉,相对测高精度,去相关
中图分类号:TN959.74 文献标识码:A

文章编号:1009-5896(2006)12-2236-04

Analysis of Relative Height Accuracy for Master Satellite and Distributed Small Satellite SAR Interferometry

Liu Jian-ping Liang Dian-nong He Feng
(College of Electric Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract Relative height accuracy is one of key indexes for SAR interferometry. In this paper, based on actual geometrical condition for master satellite and distributed small satellite SAR system, height measure principle is established. Based on geometrical condition of relative height measure, the relations between relative height accuracy and interferometric phase error are deduced. Then, noise decorrelation, baseline decorrelation and pixel misregistration decorrelation and so on, are analyzed, and the image correlation coefficient is deduced. Finally, the effect of image decorrelations to relative height accuracy is analyzed, the results indicate, for flat surface, noise decorrelation and pixel misregistration decorrelation are the main factors, and baseline decorrelation is the minor factor.

Key words Distributed small satellites, SAR Interferometry, Relative height accuracy, Decorrelation

1 引言

小卫星分布式 SAR 系统是以 SAR 作为有效载荷,小卫星群编队飞行,它们之间协同工作,共同完成单项或者多项任务,在功能上等效于一个虚拟的大卫星,能够克服以上传统单星 SAR 的不足,实现系统性能的提升和功能的增加。它主要有两种体制:一是多发多收体制,即每个小卫星的雷达既有发射能力又有接收能力;一是单发多收体制,即仅有一个小卫星的雷达具有发射又有接收能力,而其他雷达都仅有接收能力。主星带小卫星分布式 SAR 系统属于单发多收体制,它是用传统大卫星带多颗小卫星的方式实现,利用在轨或即将发射的 SAR 卫星作为主星进行发射,技术难度相对较小,可实现性较大,具有较好的抗干扰能力。

与经典干涉 SAR 相同,主星带小卫星分布式 SAR 干涉的相对测高精度主要与干涉相位误差有关,而干涉相位误差又受图像去相关影响。文献[1-4]对法国的干涉车轮系统的相对测高精度分析主要讨论了系统热噪声、模糊度、量化噪声和体散射的影响,并且假定基线去相关的影响通过预置距离向滤波器和方位滤波器滤除,但是加预滤波器会带来两点不足:一是应用于植被地形时,结果未知;二是有些情况下,

预滤波器是不能用的^[5]。这些文献的另一个主要问题就是,所有分析都建立在经典的干涉测高原理基础上,而忽略了主星带小卫星分布式 SAR 系统的实际空间几何关系。因此,本文首先在主星带小卫星分布式 SAR 系统的实际空间几何条件下建立了干涉测高原理,在此基础上推导了相对测高精度表达式,以及分析了各种图像去相关因素,为主星带小卫星分布式 SAR 系统干涉测高的性能分析提供理论依据。

2 干涉测高原理

主星带小卫星分布式 SAR 干涉的几何关系如图 1 所示。测绘带内散射点经主星雷达天线照射后向各方向散射,分别被小卫星 S_1 , S_2 的雷达接收,波程差为目标到两个小卫星距离差,与目标到主星的距离无关。图 1 中所示为在小卫星 S_1 的轨道坐标系下的几何关系: S_1 , S_2 间的基线长度等于 B , 其方位角和俯仰角分别等于 α 、 β ; S_1 地心距为 H_0 , 卫星高度矢量 os_1 和天线视线方向决定了 S_1 天线的距离-高度平面 (range-elevation plane), 即图中的 OS_1T 平面, 该平面与轨道面之间二面角为 ψ , 由天线指向和卫星姿态确定; 目标 T 位于距离-高度平面内, T 与 S_1 间的距离 r_1 和下视角 θ 决定了 T 的地心距 h 。

可以看出,图 1 中小卫星分布式 SAR 系统 cross-track 干

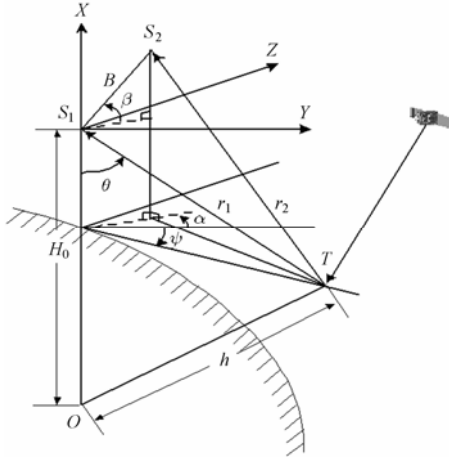


图1 主星带小卫星分布式SAR干涉的几何关系

Fig.1 Geometrical relation for master satellite and distributed small satellite SAR interferometry

与经典的星载SAR cross-track干涉相比,其显著区别在于前者的干涉基线矢量和目标高度矢量不在同一个平面内。 S_2 点的坐标为 $(B\sin\beta, B\cos\beta\cos\alpha, B\cos\beta\sin\alpha)$, 散射点 T 坐标为 $(-r_1\cos\theta, r_1\sin\theta\cos\psi, r_1\sin\theta\sin\psi)$, 则 T 与 S_2 的距离 r_2 :

$$r_2 = \left[(B\sin\beta + \cos\theta)^2 + (B\cos\beta\cos\alpha - r_1\sin\theta\cos\psi)^2 + (B\cos\beta\sin\alpha - r_1\sin\theta\sin\psi)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

当 $r_1 \gg B$ 由 $r_1 - r_2 = \Delta r = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi$, 可得

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(B(\sin\beta\cos\theta - \cos\beta\cos(\alpha - \psi)\sin\theta) + \frac{B^2}{2r_1} \right) \quad (2)$$

T 的地心距 h 为

$$h = \sqrt{H_0^2 + r_1^2 - 2H_0r_1\cos\theta(\Delta\phi, B, r_1, \alpha, \beta, \psi)} \quad (3)$$

上式描述了地心距 h 与7个特征变量: S_1 地心距 H_0 , T 与 S_1 间的距离 r_1 , 干涉相位 $\Delta\phi$, 基线长度 B , 基线方位角 α , 基线俯仰角 β , 以及 S_1 天线的距离-高度平面与轨道面之间的二面角 ψ 之间的函数关系。

3 相对测高精度分析

相对测高几何关系如图2所示, S_T 表示主星, S_1 、 S_2 为两颗小卫星, A 、 B 表示两个距离 S_1 有相同斜距 R 的地面目标, 且 B 相对于 A 的高度为 Δh , 图2中其他几何关系与图1相同。

根据式(2), 目标 A 产生的干涉相位为

$$\Delta\phi_A = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(B(\sin\beta\cos\theta_1 - \cos\beta\cos(\alpha - \psi_1)\sin\theta_1) + \frac{B^2}{2R} \right) \quad (4)$$

同样, 目标 B 产生的干涉相位为

$$\Delta\phi_B = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(B(\sin\beta\cos(\theta_1 + \Delta\theta)) + \frac{B^2}{2R} \right)$$

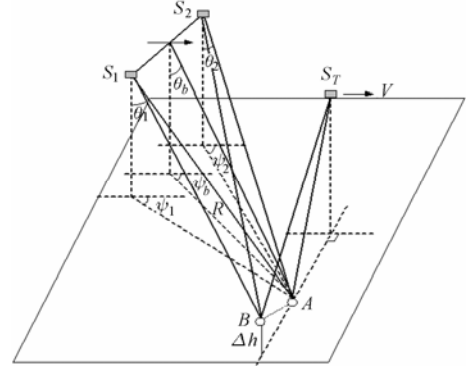


图2 相对测高几何关系图

Fig.2 Geometrical relation for relative height measure of master satellite and distributed small satellite SAR interferometry

$$-\cos\beta\cos(\alpha - (\psi_1 + \Delta\psi)\sin(\theta_1 + \Delta\theta)) + \frac{B^2}{2R} \quad (5)$$

式中 $\Delta\theta$ 表示相对下视角, $\Delta\psi$ 表示相对方位角。由于目标 A 、 B 位于主星的距离-高度平面内, 所以 $\Delta\theta \gg \Delta\psi$, $\Delta\psi$ 可忽略, 且

$$\Delta h = R\cos\theta_1 - R\cos(\theta_1 + \Delta\theta) \approx R\sin\theta_1 \cdot \Delta\theta \quad (6)$$

根据式(4)~式(6), 目标 A 与 B 的干涉相位之差为

$$\Delta\phi_{AB} = \Delta\phi_B - \Delta\phi_A = \frac{2\pi}{\lambda} B(\sin\beta\sin\theta_1 + \cos\beta\cos(\alpha - \psi_1)\cos\theta_1) \frac{\Delta h}{R\sin\theta_1} \quad (7)$$

垂直基线 $B_\perp$ 的定义: $B_\perp$ 是基线矢量 B 投影到 r_1 垂线方向的长度:

$$B_\perp = (B\sin\beta, B\cos\beta\cos\alpha, B\cos\beta\sin\alpha) \cdot (\sin\theta, \cos\theta\cos\psi, \cos\theta\sin\psi)^T = B(\sin\beta\sin\theta + \cos\beta\cos\theta\cos(\alpha - \psi)) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 得到

$$\Delta\phi_{AB} = \frac{2\pi B_\perp \Delta h}{\lambda R \sin\theta_1} \quad (9)$$

则相对测高精度定义为

$$\sigma_{\Delta h} = \frac{\lambda R \sin\theta_1 \sigma_{\Delta\phi}}{2\pi B_\perp} \quad (10)$$

从式(10)可以看到, 相对测高精度主要与干涉相位测量误差有关。影响干涉相位测量误差的主要因素是由于干涉图像对去相关引起的: 对于平坦地形, 有3种^[6,7]: 图像信噪比、像素配准误差、基线去相关(baseline decorrelation); 对于植被地形来说, 还存在体散射去相关(volume decorrelation)^[8]。下面, 根据主星带小卫星分布式SAR相对测高几何关系和复图像信号模型, 推导干涉图像对的相关系数:

$$\rho = \frac{\langle s_1 s_2^* \rangle}{\sqrt{\langle s_1 s_1^* \rangle \langle s_2 s_2^* \rangle}}$$

首先, 考虑平坦地形情况下。对于分布式目标 $f(x, y)$, 以 (x_0, y_0) 为中心的地面区域复图像信号可以表示为

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \iint f(x, y) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_T(y) + r_1(y))\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc1}}{V} (x - x_0)\right) W(x - x_0, y - y_0) dx dy + n_1 \\ s_2 &= \iint f(x', y') \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_T(y') + r_2(y'))\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{f_{Dc} + f_{Dc2}}{V} (x' - x_0)\right) \cdot W(x' - x_0 + \Delta x, y' - y_0 + \Delta y) dx' dy' + n_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $W(x, y) = \sin(\pi x/R_x) \sin(\pi y/R_y) / [(\pi x/R_x)(\pi y/R_y)]$, R_x, R_y 分别表示地面方位分辨率与距离分辨率, $\Delta x, \Delta y$ 表示方位向与距离向的配置误差。若考虑地面均匀分布的散射中心不相关, 则

$$\langle f(x, y) \cdot f^*(x', y') \rangle = \sigma_0 \delta(x - x', y - y') \quad (12)$$

其中 σ_0 是地面的平均雷达散射系数。

根据相对测高几何关系, 有

$$\left. \begin{aligned} r_1(y) &\approx r_1(y_0) + (y - y_0) \sin \theta_1 \sin \psi_1 \\ r_2(y) &\approx r_2(y_0) + (y - y_0) \sin \theta_2 \sin \psi_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

将式(12)、式(13)代入到 $\langle s_1 \cdot s_2^* \rangle$, 得到

$$\begin{aligned} \langle s_1 \cdot s_2^* \rangle &= \sigma_0 \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_1(y_0) - r_2(y_0))\right) \iint \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (y - y_0)\right) \cdot (\sin \theta_1 \sin \psi_1 - \sin \theta_2 \sin \psi_2) \exp\left(j\pi \frac{f_{Dc1} - f_{Dc2}}{V} (x - x_0)\right) \cdot \frac{\sin(\pi(x - x_0)/R_x) \sin(\pi(y - y_0)/R_y)}{[\pi(x - x_0)/R_x][\pi(y - y_0)/R_y]} \cdot \frac{\sin(\pi(x - x_0 + \Delta x)/R_x) \sin(\pi(y - y_0 + \Delta y)/R_y)}{[\pi(x - x_0 + \Delta x)/R_x][\pi(y - y_0 + \Delta y)/R_y]} dx dy \quad (14) \end{aligned}$$

分别对 x, y 进行积分, 得到

$$\langle s_1 \cdot s_2^* \rangle = \sigma_0 \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_1(y_0) - r_2(y_0))\right) R_x R_y \cdot E \cdot F \quad (15)$$

其中

$$E = \left(1 - \frac{R_y}{\lambda} (\sin \theta_1 \sin \psi_1 - \sin \theta_2 \sin \psi_2)\right) \cdot \left(1 - \frac{R_x}{2V} (f_{Dc2} - f_{Dc1})\right) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} F &= \exp\left(j \frac{\pi \Delta y}{\lambda} (\sin \theta_1 \sin \psi_1 - \sin \theta_2 \sin \psi_2)\right) \cdot \frac{\sin\left\{\left(\pi \Delta y / R_y\right) \left[1 - \left(R_y / \lambda\right) (\sin \theta_1 \sin \psi_1 - \sin \theta_2 \sin \psi_2)\right]\right\}}{\left(\pi \Delta y / R_y\right) \left[1 - \left(R_y / \lambda\right) (\sin \theta_1 \sin \psi_1 - \sin \theta_2 \sin \psi_2)\right]} \cdot \exp\left(j \frac{\pi \Delta x}{2V} (f_{Dc2} - f_{Dc1})\right) \cdot \frac{\sin\left\{\left(\pi \Delta x / R_x\right) \left[1 - \left(R_x / 2V\right) (f_{Dc2} - f_{Dc1})\right]\right\}}{\left(\pi \Delta x / R_x\right) \left[1 - \left(R_x / 2V\right) (f_{Dc2} - f_{Dc1})\right]} \quad (17) \end{aligned}$$

可以看到, E 是由于干涉图像对的基线去相关带来的, 其中第 1 个乘积项表示距离向去相关, 第 2 个乘积项表示方位向去

相关。而 F 是由配准误差引起的。

两点值得注意的是: (1) 由于距离向去相关主要由于两个接收天线的视角差异造成, 且 $\Delta \theta = B_{\perp} / r$, 因此有 $\sin \theta_1 \sin \psi_1 - \sin \theta_2 \sin \psi_2 \approx \sin \psi_1 \cos \theta_1 B_{\perp} / r$; 而方位向去相关主要由两个接收天线的方位角差造成的, 且 $\Delta \psi = B_a / (r \sin \theta_1)$, $B_a = (B \cos \beta \cos \alpha, B \cos \beta \sin \alpha) (-\sin \psi_1, \cos \psi_1)^T = B \cos \beta \sin(\alpha - \psi_1)$, 表示空间基线在水平面的投影在水平视线垂直方向的分量, 故 $(f_{Dc2} - f_{Dc1}) = (2V/\lambda) \cdot \sin \theta_1 (\cos \psi_1 - \cos \psi_2) \approx (2V/\lambda) \sin \psi_1 B_a / r$, 且当 $\alpha = \psi_1$ 时, 方位向去相关为 0。(2) 当 $E = 0$ 时, 两幅复图像完全不相相关, 此时 $B_{\perp}^c = \lambda r / (R_y \sin \psi_1 \cos \theta_1)$ 或 $B_a^c = \lambda r / (R_x \sin \psi_1)$, $B_{\perp}^c, B_a^c$ 表示临界基线。

同样, 可以得到

$$\left\{ \begin{aligned} \langle s_1 \cdot s_1^* \rangle &= \sigma_0 R_x R_y + \langle n_1^2 \rangle = S + N_1 \\ \langle s_2 \cdot s_2^* \rangle &= \sigma_0 R_x R_y + \langle n_2^2 \rangle = S + N_2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

除了热噪声, 模糊信号也会增加相位噪声基底, 尤其当模糊度较大时。因为对于传统单星 SAR 来说, 天线孔径较大, 模糊度一般都小于 -20 dB, 所产生的相位噪声可以忽略不计。但是, 对于本系统, 天线孔径受小卫星平台的限制, 都比较小, 而模糊度就比较大, 尤其方位向模糊度相对较大, 所产生的相位噪声就不可忽略。另外, 量化噪声也不可忽略, 因为每个小卫星平台的存储设备容量有限, 每个 SAR 通道录取的成像数据必须经过数据量压缩处理, 这样也会对干涉相位带来噪声。因此, 复图像噪声 N_1, N_2 里不仅包含接收机热噪声功率, 还包括模糊信号功率, 以及量化噪声功率。

根据式(15), 式(18), 则

$$\rho = \frac{\langle s_1 s_2^* \rangle}{\sqrt{\langle s_1 s_1^* \rangle \langle s_2 s_2^* \rangle}} = \frac{E \cdot F}{\sqrt{1 + (S/N_1)^{-1}} \sqrt{1 + (S/N_2)^{-1}}} \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_1(y_0) - r_2(y_0))\right) \quad (19)$$

对于植被地形来说, 有效散射系数不仅与所在位置有关, 而且还是所在位置高度的函数。而实际 SAR 成像处理时并没有考虑这一点, 从而造成复图像对的去相关。文献[9]对这个问题做了较为详细的讨论, 并且建立了植被覆盖的有效散射系数模型:

$$\sigma_0(h) = \exp(-\gamma h_t) \sigma_{0\text{ground}} \delta(h) + \sigma_{0\text{tree}} \frac{\gamma}{1 - \exp(-\gamma h_t)} \cdot \exp(-\gamma(h_t - h)) \quad (20)$$

且 $0 \leq h \leq h_t$, 其中 h_t 为植被高度。参数 γ 与波束入射角、植被类型有关, 反映了植被吸收、散射引起的辐射衰减。体散射去相关 ρ_v 的解析表达式如下^[9]:

$$\rho_v = \frac{\int \sigma_0(h) \exp\left\{\left[-2\pi B_{\perp} \cos(a) / (\lambda r \sin(\theta_0 - a))\right] j \cdot h \cdot dh\right\}}{\int \sigma_0(h) dh} \quad (21)$$

式中 α 表示地形坡度角。

根据干涉复图像对的去相关,考虑图像视数,本文应用克拉美-罗界来估计干涉相位测量方差^[9]:

$$\sigma_{\Delta\phi} = \frac{1}{\sqrt{2N_L}} \frac{\sqrt{1-\rho^2}}{\rho} \quad (22)$$

4 仿真分析

下面仿真平坦地形下 5m 相对测高精度分别对信噪比、基线去相关与配准误差的要求。假定 $\alpha = \psi_1$, 不考虑方位向去相关,且 $N_L = 1$, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Parameters of simulation	
雷达波长 λ	0.24m
带宽 B_w	30MHz
波束视角 θ_1	35°
波束方位角 ψ_1	85°
轨道高度 H	800km
方位向分辨率 R_x	5m
地面坡度角 α	0°

根据仿真参数,可知 $B_L^c = 37.97$ km, 考虑到卫星编队构形大小的约束,这里选择 $1\text{km} \leq B_L \leq 6\text{km}$, 即 $0.05 \leq B_L/B_L^c \leq 0.15$ 。图 3 分别给出了信噪比、基线去相关与配准误差对于相对测高精度的影响。

图 3(a)比较了不同信噪比条件下对于相对测高精度的影响,根据式(19),可以看出信噪比越高,影响相对测高精度越小,且当 $S/N > 5\text{dB}$ 时,满足 5m 相对测高精度要求;图 3(b)是根据式(16)计算得到,可以看出基线去相关对相对测高精度的影响都满足 5m 要求,这主要是由于编队小卫星之间距离较大, B_L 接近最优基线,这是传统星载干涉 SAR 系统无法比拟的;图 3(c)比较了不同像素配准误差对于相对测高精度的影响,根据式(17)得到。可以看到配准误差越大,影响相对测高精度越大,且当 $\Delta x \leq R_x/8, \Delta y \leq R_y/8$ 时,满足 5m

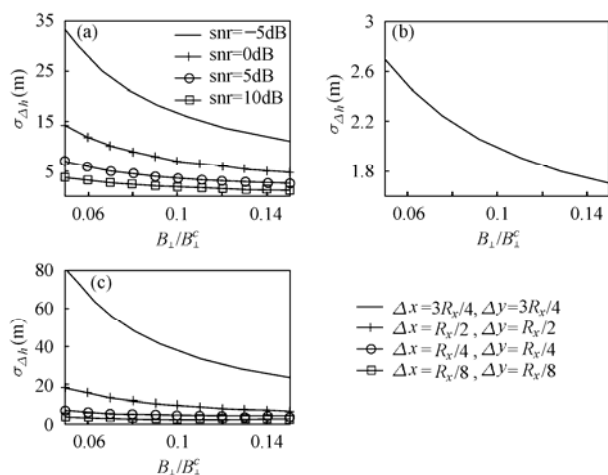


图 3 噪声、基线去相关和配准误差对于相对测高精度的影响

(a) 信噪比 (b) 基线去相关 (c) 配准误差

Fig.3 Noise, baseline decorrelation and pixel misregistration on the effect to relative height accuracy

(a) Noise (b) Baseline decorrelation (c) Pixel misregistration

相对测高精度要求。比较图 3(a), 3(b)和 3(c)可知,对于平坦地形来说,信噪比与配准误差是影响相对测高精度的主要因素,而基线去相关影响相对较小,这是与传统星载干涉 SAR 系统不同。本文这里只给出了单视情形下的仿真结果,当信噪比与配准误差不能满足要求时,可以进行多视处理,改善相对测高精度。

5 结束语

本文根据主星带小卫星分布式 SAR 系统的实际空间几何条件下建立了干涉测高原理;基于相对测高几何,推导了相对测高精度与干涉相位误差的关系式;接着理论分析了基线去相关、图像配准误差去相关、热噪声去相关等,并推导了图像相关系数;为主星带小卫星分布式 SAR 系统干涉测高的性能分析提供理论依据。

参考文献

- [1] Fiedler H, Krieger G, Jochim F, Kirschner M, Moreira A. Analysis of satellite configurations for spaceborne SAR interferometry. International symposium on Formation Flying, Berlin, Germany, October 2002, Session 2.
- [2] Krieger G, Wendler M, Fiedler H, Mittermayer J, Moreira A. Comparison of the Interferometric Performance for Spaceborne Parasitic SAR Configurations. Cologne, Germany, EUSAR 2002: 467–471.
- [3] Mittermayer J, Krieger G, Moreira A, Wendler M. Interferometric performance estimation for the interferometric cartwheel in combination with a transmitting SAR-satellite. IGARSS 2001: 2955–2957.
- [4] Massonnet D. capabilities and limitation of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geoscience. and Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506–520.
- [5] Mrstik V, VanBlaricum G, Cardillo G, Fennell M. Terrain height measurement accuracy of interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(1): 219–228.
- [6] Just D. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 980–984.
- [7] Zebker H A. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans on Geoscience. Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950–959.
- [8] Rodriguez E. Theory and design of interferometric SAR. *IEE Proc.-F*, 1992, 139(2): 147–159.
- [9] Rosen P A. Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*, 2000, 88(3): 333–382.

刘建平: 男, 1975 年生, 博士, 研究方向为雷达信号处理、小卫星分布式 SAR 系统。

梁甸农: 男, 1936 年生, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、小卫星分布式 SAR 系统。

何峰: 男, 1976 年生, 博士, 研究方向为雷达信号处理、小卫星分布式 SAR 系统。